

Optionen für eine nachhaltige Energieversorgung

5

Martin Faulstich*, Michael Weber**, Christian Hey** und Matthias Herms***

Auf der Klimakonferenz der Vereinten Nationen im Jahr 2010 im mexikanischen Cancún erklärten die Vertragsstaaten ihre Absicht, den globalen Temperaturanstieg auf 2 Grad Celsius gegenüber vorindustriellen Werten zu begrenzen. Die Erreichung dieses Ziels verlangt von Industrieländern wie Deutschland ihre Emissionen bis 2050 um 80 bis 95% zu reduzieren (vgl. IPPC 2007). Das größte Wachstum der globalen Emissionen im Zeitraum von 1970 bis 2004 hat zweifelsohne im Bereich der Energieversorgung stattgefunden. Strom als eine in Deutschland besonders CO₂-intensive Energieform spielt beim Klimaschutz – neben der Wärme und Mobilität – die herausragende Rolle. Im Jahr 2009 war die Stromerzeugung für fast die Hälfte der deutschen CO₂-Emissionen des Energiebereichs verantwortlich. Die Erzeugung von Energie basiert nach wie vor in allen Bereichen im Wesentlichen auf dem Einsatz fossiler Rohstoffe, im Strombereich in Deutschland vorzugsweise auf Kohle. Allerdings bedeuten gesamtgesellschaftliche Emissionsreduktionen von 80 bis 95% für den Stromsektor eine nahezu vollständige Emissionsvermeidung, da die Emissionen der anderen Bereiche allein aus technischen Gründen bis 2050 nicht umfassend oder nur zu vergleichsweise hohen Kosten vermieden werden können. Für den Stromsektor sind technologische Alternativen bereits vorhanden oder befinden sich in der fortgeschrittenen Entwicklungsphase. Nach einem Modell der Europäischen Kommission, das den Weg zu einer 80%igen Reduktion der europäischen Treibhausgasemissionen beschreibt, muss die Dekarbonisierung des Stromsektors zügig vorangetrieben und im Jahr 2040 nahezu vollständig klimaneutral sein (vgl. Europäische Kommission 2011).

Grundsätzlich sind aus Sicht des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU) zwei Lösungsansätze zur Erreichung einer dekarbonisierten Stromerzeugung denkbar: Die Steigerung der Energieeffizienz und der Ausbau der erneuerbaren Energien. Die Reduzierung der Stromnachfrage durch Steigerung der Effizienz ist zunächst eine entscheidende Voraussetzung für die Transformation der Stromerzeugung. Viele Möglichkeiten Energie zu sparen, sind kostengünstig und relativ einfach umzusetzen. Bislang ist es jedoch noch nicht im notwendigen Umfang gelungen, die existierenden Potenziale zur Einsparung von Strom tatsächlich zu realisieren. Dass die wirtschaftlichen Potenziale der Effizienzsteigerung heute nur in Ansätzen erschlossen sind, ist auf eine Reihe struktureller, ökonomischer und sozialpsychologischer Hemmnisse zurückzuführen. Oftmals verhindern Informations- und Motivationsdefizite auf Verbraucher- wie

auch auf Anbieterseite den effizienten Einsatz elektrischer Energie. Ein weiterer Grund ist das Nutzer-Investor-Dilemma, welches auch häufig im Zusammenhang mit Energieeffizienz auftritt, und zwar dann, wenn die Anreize zu Einsparungen gering sind, da der Investor nicht oder nur eingeschränkt von ihnen profitiert (vgl. z.B. SRU 2008).

Ein bekanntes Beispiel, dass Effizienzsteigerungen nicht notwendigerweise zu einer Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs führen, ist der Rebound-Effekt. Er beschreibt Mehrverbräuche oder zusätzliche Energieanwendungen, die den



Prof. Dr. Martin Faulstich

© Markus Peherstorfer

* Prof. Dr. Martin Faulstich ist Inhaber des Lehrstuhls für Rohstoff- und Energietechnologie an der Technischen Universität München und Vorsitzender des Sachverständigenrats für Umweltfragen.

** Dr. Christian Hey ist Generalsekretär und Michael Weber ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Sachverständigenrats für Umweltfragen.

*** Matthias Herms ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität München.

vorangegangenen Einsparerfolgen entgegenlaufen oder sie gar wieder aufheben. Auch die bisherige Entwicklung der Stromnachfrage in Deutschland zeigt oftmals, dass Effizienzsteigerungen bei einzelnen Energieanwendungen nicht notwendigerweise zu einem Sinken des Gesamtenergieverbrauchs führen. Der Rebound-Effekt bezeichnet dabei den Anteil, der auf der technischen Ebene eingesparten Energie, der durch die Steigerung der Nachfrage wieder kompensiert wird (vgl. Sorrell 2007).

Energieeffizienz ist der Schlüssel dazu, den Stromverbrauch in Deutschland nachhaltig zu senken. Um Anreize für energieeffiziente Maßnahmen zu setzen, sollten einerseits funktionierende Märkte für Energieeffizienz geschaffen werden, andererseits muss sichergestellt werden, dass Einsparungen durch einzelne Maßnahmen auch tatsächlich zu einer Reduktion der Gesamtnachfrage führen. Vor diesem Hintergrund sollte auf nationaler Ebene ein absolutes Verbrauchsziel für den Strombedarf formuliert und langfristig eine Reduzierung des Stromverbrauchs angestrebt werden. Als mögliche Instrumente der Effizienzpolitik werden ein Energieeffizienzfonds und die Einführung weißer Zertifikate diskutiert (vgl. Irrek und Thomas 2006; Duscha et al. 2006). Darüber hinaus hat der SRU mit dem Stromkundenkonto ein neues effizienzpolitisches Konzept vorgeschlagen, dass auf einer Begrenzung des absoluten Stromverbrauchs für den Bereich der privaten Haushalte beruht (vgl. SRU 2011). Unternehmen, die Strom an private Haushalte liefern, werden dazu verpflichtet, die gelieferte Strommenge insgesamt zu begrenzen, nicht verkaufte Kontingente sind handelbar. Das Gesamtbudget wird ermittelt aus einer pauschalen Liefermenge pro Haushaltskunden (Stromkundenkonto) und der Gesamtzahl der privaten Kunden eines Unternehmens. Dieses »Cap-and-Trade«-System auf Versorger-ebene schafft Anreize auf Seiten der Stromproduzenten, Einsparbemühungen ihrer Kunden zu unterstützen.

Nachhaltige Energieerzeugung

Nachhaltigkeitsbewertung der Stromerzeugungsoptionen

Technologieentscheidungen der Energiepolitik sollten sich nicht nur der Klimafreundlichkeit, sondern auch an weiteren Kriterien der Nachhaltigkeit und Vorsorge orientieren, wie sie auch in der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung verankert sind. Insgesamt wird jede Erzeugung von Energie immer auch mit Eingriffen in den Naturhaushalt verbunden sein. Nachhaltigkeit in der Stromversorgung bedeutet daher, durch Abwägung die beste verfügbare Lösung zu finden. In diesem Sinne ist die Einsparung von Energie in der Regel die beste Option. Es ist jedoch bei allen denkbaren Anstrengungen zur Energieeinsparung und -effizienz davon auszugehen, dass auch zukünftig ein hoher Nachfragesockel an Elektrizität gedeckt werden muss.

Grundsätzlich stehen die Nutzung der Kernkraft, die fossile Stromerzeugung mit und ohne Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (CCS), sowie die erneuerbaren Energien als Optionen zur Deckung der Stromnachfrage zur Diskussion und müssen anhand der verschiedenen Kriterien der Nachhaltigkeit und Vorsorge, wie beispielsweise Ressourcenverfügbarkeit, Emissionen, Sicherheit, Flächennutzung, Reversibilität, Standortwahl und den Kosten, bewertet werden.

Die Nutzung der Kernenergie ist zwar mit relativ niedrigen Treibhausgasemissionen verbunden, aufgrund der letztlich nicht vollständig auszuschließenden und in ihren Folgen zeitlich und räumlich nicht eingrenzenden Unfallrisiken sowie eines seit Jahrzehnten ungelösten Endlagerproblems stellt sie aber keine nachhaltige Option dar. Eine Vollversorgung mit Strom aus Kernkraftwerken würde zudem den Neubau vieler Dutzend Meiler bedeuten, was, ungeachtet der jüngsten Vorkommnisse in Japan, außerhalb jeglicher politischer Diskussion ist. Neue effizientere konventionelle Kohlekraftwerke sind aus Klimaschutzgründen nicht zielführend, da ihre ökonomische Lebensdauer über den Zielhorizont einer Dekarbonisierung (2050) hinausreicht (vgl. Hohmeyer und Hartmann 2010). Mit der Kohleverstromung sind zudem gravierende Eingriffe bei der Rohstoffgewinnung und – trotz wirksamer Luftreinhaltungsmaßnahmen – signifikante Immissionsbelastungen verbunden. Auch die Abscheidung und Ablagerung von Kohlendioxid stellt nur einen sehr beschränkten Ansatz dar, da der Einsatz von CCS durch begrenzte Speicherkapazitäten und Nutzungskonkurrenzen limitiert ist und die politische Durchsetzbarkeit der Speicherorte schwierig erscheint (vgl. SRU 2009, darüber hinaus Leipprand et al. 2009). Der Energieverbrauch muss zukünftig von der Nutzung fossiler Rohstoffe entkoppelt werden. Die einzig verbleibende zukunftsfähige Option sind daher die erneuerbaren Energien. Auch bei erneuerbaren Energien können Landnutzungskonflikte und, insbesondere beim Anbau von Energiepflanzen, auch klimaschädliche Landnutzungsänderungen und Beeinträchtigungen des Naturhaushalts auftreten, allerdings lassen sich diese Probleme durch eine geeignete Standortwahl sowie eine raumordnerische Steuerung des Anlagenbaus minimieren. Grundsätzlich sind genügend Standorte zu nachhaltigen Herstellung von erneuerbarer Energie vorhanden, das europaweite Potenzial ist jedenfalls deutlich größer als der Bedarf.

Überblick über 100%-erneuerbare-Energien-Studien

In den letzten zwei Jahren haben die zahlreich entstandenen Studien bewiesen, dass sowohl auf europäischer (für einen Überblick vgl. Hertin et al. 2010) als auch auf nationaler Ebene (vgl. Tab. 1) eine zu 100% durch erneuerbare Energie (EE) gedeckte Stromversorgung technisch machbar ist. Dabei ist nicht nur die mittlerweile große Zahl dieser

Tab. 1
Überblick über Studien zu einer vollständig erneuerbaren Stromversorgung in Deutschland

Titel	Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung				Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen		Energiekonzept 2050		Modell Deutschland: Klimaschutz bis 2050*		Klimaschutz: Plan B – Energiekonzept für Deutschland		Roadmap 2050**	
Herausgeber	Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU)				Umweltbundesamt (UBA)		Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE)		World Wild Fund For Nature (WWF)		Greenpeace		European Climate Foundation (ECF)	
Berechnungen	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)				Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES)		Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE)		Öko-Institut e.V. und Prognos AG		EUtech		McKinsey & Company, KEMA, The Energy Futures Lab Imperial College London, Oxford Economics, ECF	
Erscheinungsjahr	2010				2010		2010		2009		2009		2010	
Szenario	Szenario 2.1a		Szenario 2.1b		Regionenverbund mit Wasserstoffspeicher				Innovation ohne CCS					
Strombedarf in TWh/a	511		701		557		764		453		468		4 900	
Stromerzeugung:	TWh/a	%	TWh/a	%	TWh/a	%	TWh/a	%	TWh/a	%	TWh/a	%	TWh/a	%
Wind	408	80	408	58	347	62	390	51	209	46	255	54	1 470	30
Photovoltaik	42	8	112	16	104	19	112	15	28	6	50	11	1 176	24
Geothermie	0	0	120	17	50	9	60	4	36	8	93	20	343	7
Biomasse	34	7	34	5	11	2	30	8	41	9	45	10	588	12
Wasserkraft	28	5	28	4	22	4	30	4	25	5	25	5	588	12
Speicher	0	0	0	0	0	0	0	0	55	12	0	0	0	0
Nettoimporte	0	0	0	0	22	4	142	18	48	11	0	0	735	15
Merkmale	Stundengenauere, kostenoptimierte Szenarien; Nutzung der Speicherpotenziale in Norwegen; ausgeglichene Import-Export-Bilanz				Nutzung der Potenziale aller Regionen; geringer Stromimport; Nutzung von Pumpspeicherkraftwerken und Methan- und Wasserstoffspeichern; Simulation auf Basis der Wetter- und Lastcharakteristik von vier Beispieljahren		Importe aus Europa und Nordafrika; Differenzkostenbetrachtung		hohe Energieeffizienzpotenziale		hohe Energieeffizienzpotenziale; Atomausstieg bis 2015 und Kohleausstieg bis 2040; ausgeglichene Import-Export-Bilanz		Fokus auf Ausbau des Übertragungsnetzes; außereuropäische Importe	
* 97% erneuerbare Energien. – ** Bezugsraum Europa.														

* 97% erneuerbare Energien. – ** Bezugsraum Europa.

Quelle (verändert und ergänzt nach Agentur für erneuerbare Energien (o. J.)): SRU (2011); UBA (2010); FVEE (2010); WWF (2009); Greenpeace (2009); ECF (2010).

Studien auffällig, sondern auch deren Detailtiefe. Das für die unterschiedlichen Szenarien des SRU verwendete REMix-Modell des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Stuttgart (DLR) erfasst die Stromerzeugungspotenziale erneuerbarer Energieträger in Deutschland, Europa und Nordafrika in einer hohen Auflösung (Rasterzellen von 10 km x 10 km). Siedlungsflächen, ökologisch sensible Gebiete und Flächen mit konkurrierender Landnutzung wurden von der Potenzialanalyse ausgenommen oder nur eingeschränkt berücksichtigt. Das Modell arbeitet im Vergleich zu vielen anderen Studien außerdem mit einer zeitlich sehr hohen Auf-

lösung von einer Stunde und kann daher die Stromerzeugung im Jahresverlauf stundengenau auf die Nachfrage abstimmen. Dabei wird zudem ein kostenoptimaler Strommix aus erneuerbaren Energien berechnet.

Potenziale in Deutschland und Europa

Alle Studien kommen zu dem Ergebnis, dass die Potenziale der erneuerbaren Stromerzeugung die jährliche Nachfrage übersteigen. Das Potenzial zur erneuerbaren Stromerzeugung in Europa und Nordafrika entspricht dem etwa

zwanzigfachen des Bedarfs. Das REMix-Modell der SRU-Szenarien hat auf der Basis eines durchschnittlichen Windjahrs und durchschnittlicher Sonnenverhältnisse allein für Deutschland ein jährliches Erzeugungspotenzial für Elektrizität aus regenerativen Energiequellen von 839 TWh berechnet. Das Potenzial liegt damit deutlich über dem heutigen jährlichen Stromverbrauch von etwa 600 TWh/a und weit über den Annahmen der Zielszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung – dort wird für das Jahr 2050 ein vergleichsweise niedriger Verbrauch von 410 bis 430 TWh/a angenommen. Abhängig von der Entwicklung der Stromnachfrage kann eine vollständige Selbstversorgung Deutschlands allerdings sehr teuer werden und ist ohnehin nicht erstrebenswert. Nach den Berechnungen des REMix-Modells können die ersten 400 TWh/a zu sehr niedrigen Grenzkosten von unter 0,05 Euro/kWh produziert werden. Weitere 212 TWh/a dieses Potenzials können noch zu Grenzkosten von circa 0,96 Euro/kWh erzeugt werden. Bei einer höheren Nachfrage steigen dann allerdings die Grenzkosten deutlich an.

Attraktiver wäre ohnehin ein Stromverbund mit anderen europäischen Ländern und auch mit Nordafrika. Das regenerative Elektrizitätserzeugungspotenzial für die Region Europa-Nordafrika liegt laut den Berechnungen des REMix-Modells bei circa 105 000 TWh/a. Über 47 000 TWh/a lassen sich zu Grenzkosten von weniger als 0,05 Euro/kWh erzeugen.

Aufgrund der erheblichen Potenziale sowohl in Deutschland als auch im restlichen Europa und Nordafrika besteht ein Gestaltungsspielraum durch eine große Standortauswahl bei den regenerativen Technologien. Ökologische Probleme des Ausbaus lassen sich folglich durch planerische Gestaltung und politische Zielvorgaben umgehen. Ein Konflikt zwischen dem Ausbau erneuerbarer Energien und dem Naturschutz kann also vermieden werden.

Perspektive Windenergie

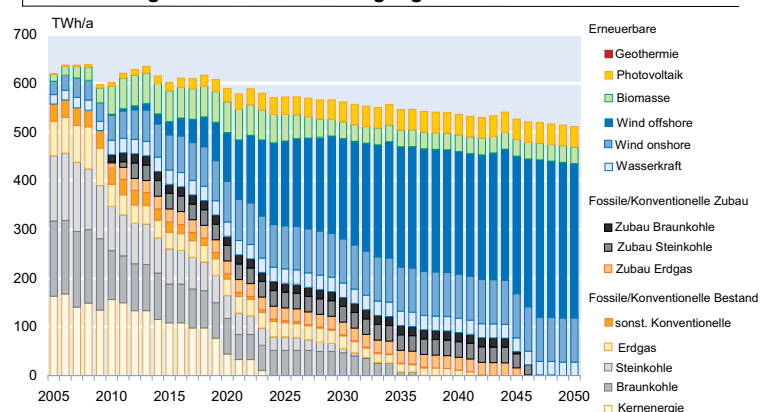
Das enorme Potenzial bedeutet aber auch, dass es wichtig ist, intelligent zu investieren. Kosteneffizient ist es, wenn die Elektrizitätserzeugung der regenerativen Energiequellen ausgebaut wird, die am preiswertesten die größte Menge an Strom liefern. In Deutschland liegen die günstigsten Potenziale im Bereich der Windenergienutzung. Die Analyse der EE-Studien spiegelt dies ebenfalls wider. Allen Studien ist gemeinsam, dass die Windenergie mit mindestens 46% die tragende Säule der deutschen Stromversorgung wird (vgl. Tab. 1). Es ist zu erwarten, dass die Stromgestehungskosten der Windenergie innerhalb der nächsten

15 Jahre unter die konventioneller Kraftwerke fallen. Dabei wird zunächst die Onshore-Windenergie wettbewerbsfähig, dann aber auch die Offshore-Windenergie. Aufgrund geringer Erfahrungen mit der Technologie letzterer liegen die Grenzerzeugungskosten zunächst noch über denen von Onshore-Anlagen. Aufgrund der günstigen Windverhältnisse auf See kann diese Technologie allerdings zu einem wichtigen Sockel der zukünftigen Stromversorgung werden. 7 000 bis 8 000 solcher Windkraftanlagen der neuen Generation mit einer Leistung von 10 Megawatt pro Turm könnten 60 bis 70% des Strombedarfs in Deutschland decken. Dabei bestehen weitreichende rechtliche Regelungen zum Schutz der Meere, insbesondere des ökologisch sensiblen Wattenmeers. Beim Ausbau der Offshore-Windenergie muss darauf geachtet werden, die negativen Umweltauswirkungen von Standortwahl, Bau und Betrieb zu vermeiden oder so gering wie möglich zu halten. Energiewende und Naturschutz sind durchaus gleichermaßen möglich.

Übergang bis 2050

Um den Übergang zu einer 100% erneuerbaren Stromversorgung zu ebnen, müssen erneuerbare Energien fossile Energieträger schrittweise ersetzen. Abbildung 1 zeigt dazu eines von insgesamt acht Szenarien mit unterschiedlichem Strombedarf und unterschiedlichem europäischen Vernetzungsgrad, die der SRU beim DLR in Auftrag gegeben hat. Weder Atomkraft nach 2023 noch der Bau neuer Kohlekraftwerke (mit CCS) sind für eine erfolgreiche Energiewende erforderlich. Aufgrund der hohen Volatilität der erneuerbaren Energien ist jedoch eine erhöhte Flexibilität des Kraftwerksparks gefordert. Die Anzahl notwendiger Abschaltungen und schneller Ab- und Anfahrvorgänge zur Bewältigung der sogenannten Residuallast wird erheblich steigen. Der Bedarf einer dauerhaft gleichmäßigen Grundlast besteht demnach nicht mehr.

Abb. 1
Entwicklung der Bruttostromerzeugung bis 2050



Randbedingungen: Deutschland, 15% Stromaustausch mit Dänemark und Norwegen, Wärmekraftwerke 35 Jahre Laufzeit, Modell DLR REMix

Quelle: SRU (2011).

Wie die notwendige Flexibilisierung des Elektrizitätsversorgungssystems erreicht werden kann, wird die zentrale Diskussion der nächsten Jahre werden. Während sich die 100%-EE-Studien in der Frage einig waren, dass eine erneuerbare Vollversorgung möglich ist, so unterscheiden sie sich allerdings im Umgang mit den Herausforderungen des Übergangs. Während das Umweltbundesamt (Wasserstoff- bzw. Methanspeicher) und der SRU (Pumpspeicher in Norwegen) die Notwendigkeit von Speichern hervorheben, betonen Greenpeace und WWF vor allem die Bedeutung von Effizienzinsparungen. Ein niedrigerer Stromverbrauch und damit auch eine niedrigere nachgefragte Maximalleistung verringern den Bedarf an Residuallast zu allen Zeiten erheblich. Die europäischen Studien, wie auch das Europa-Nordafrika Szenario des SRU, hingegen belegen die Attraktivität überregionaler Stromverbünde. Theoretisch wäre in einem vollkommen vernetzten Versorgungssystem über Europa und Nordafrika keine Speicherung von Elektrizität erforderlich. Ob dies wiederum die ökonomisch sinnvollste Lösung ist, lässt sich bezweifeln. Die Bundesregierung wählt derzeit einen anderen Weg und plant den Bau flexibler konventioneller Kraftwerke zu fördern (vgl. Bundesregierung 2011). Neben flexiblen Gaskraftwerken wird auch ein Anreizinstrument für den Bau effizienter Kohlekraftwerke in Erwägung gezogen. Vor diesem Weg ist eindringlich zu warnen. Neue Kohlekraftwerke sind aufgrund ihrer durchschnittlichen Lebensdauer von 40 Jahren nicht mit den Emissionsreduktionsanforderungen des Stromsektors vereinbar. Außerdem erreichen selbst effiziente Kohlkraftwerke nicht die Flexibilität von Gaskraftwerken, deren Bau, wenn neue Kapazitäten denn überhaupt als notwendig betrachtet werden, daher zu bevorzugen ist.

Flankierung des Emissionsrechtehandels mit dem EEG

Mit dem Beginn der ersten Phase des europäischen Emissionsrechtehandels im Jahr 2005 wurde ein wichtiger Pfeiler für eine gesamteuropäische Klimaschutzpolitik gesetzt. Die Festlegung eines Preises für CO₂-Emissionen kann zur besseren Marktdurchdringung der erneuerbaren Energien beitragen. In der Theorie führt der Emissionsrechtehandel zu einer kostenminimalen Erreichung des festgesetzten Vermeidungsziels. Prominente Kritiker des bundesdeutschen und europäischen Instrumentenmix vertreten den Standpunkt, dass zusätzliche Instrumente die Steuerung der CO₂-Emissionen durch den Emissionsrechtehandel behindern, zu einem Abweichen vom kosteneffizientesten Pfad beitragen und somit keinen Beitrag zum Klimaschutz leisten (vgl. Sinn 2008; Monopolkommission 2009; Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung 2009; Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit 2004; Donges et al. 2009; RWI 2009). Selbst der SRU ging zunächst davon aus, dass

ein global organisierter Emissionsrechtehandel allein die nötigen Impulse geben könnte, um den Klimawandel einzudämmen (vgl. SRU 2006).

Tatsächlich hat der europäische Emissionshandel bislang nur einen moderaten Einfluss auf unternehmerisches Handeln. Einer Studie von KfW und ZEW zur Folge haben seit 2008 lediglich 40% der Unternehmen ihre internen CO₂-Minderungskosten bewertet, für 30% war das Thema nachrangig, wiederum 30% haben eine Bewertung bewusst unterlassen (vgl. KfW und ZEW 2011). Abgesehen davon, dass der Emissionshandel nur private Kosten minimieren kann und über die Emissionen hinausgehende externe Kosten wie zum Beispiel nicht einkalkulierte Sicherheitsrisiken der Nuklearenergie und das ungelöste Problem der Endlagerung nicht berücksichtigt, gibt es weitere Gründe für eine Flankierung des Emissionshandels sowohl durch Instrumente zur Förderung erneuerbarer Energien als auch zur Steigerung der Energieeffizienz. Im Folgenden werden besonders herausragende Argumente für eine Flankierung des Emissionsrechtehandels mit dem EEG aufgeführt (vgl. auch Holm-Müller und Weber 2010; Matthes 2010; Fischedick und Samadi 2010).

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) steht seit der Einführung des europäischen Emissionsrechtehandels im Kreuzfeuer der Befürworter einer monoinstrumentellen Klimaschutzpolitik. Durch das EEG würden zwar in Deutschland bei der Stromproduktion weniger CO₂-Emissionen ausgestoßen, dies führe allerdings aufgrund der geringeren Nachfrage zu einem Preisverfall der Emissionsrechte. In der Folge könnten deutsche Emittenten in anderen Sektoren und allgemein Emittenten in anderen europäischen Ländern Verschmutzungsrechte günstiger erwerben. Die Menge der für Europa kumulierten Emissionen definiere sich weiterhin über die Zahl der ausgegebenen Zertifikate. Durch zusätzliche Maßnahmen würden lediglich die Kosten für die deutschen Stromverbraucher steigen (vgl. Sinn 2008; Frondel und Ritter 2010). Grundsätzlich muss bei der Diskussion über den deutschen Strommarkt stärker berücksichtigt werden, dass dieser in seiner Grundstruktur vom vollkommenen Markt in der volkswirtschaftlichen Theorie stark abweicht. Den Nachfragern steht ein Angebotsoligopol gegenüber, das die derzeitigen Strukturen optimal nutzen kann, um hohe Gewinne zu erwirtschaften. Zudem weisen die Strommärkte noch weitere Wettbewerbsverzerrungen im Bereich der konventionellen Energieträger auf, man denke nur an die bereits erwähnten nicht eingepreisten Sicherheitsrisiken der Kernenergie, aber auch an die Subventionen für den Kohleabbau und allgemein an potenzielle Klima- und Umweltschäden, die der Strompreis nicht berücksichtigt (vgl. Gawel und Lehmann 2011).

In einem Punkt ist die Kritik jedoch angemessen: Die technologiespezifischen Fördersätze haben in der Vergangen-

heit zu einer Überförderung der Photovoltaik geführt. Deren Ausbau war und ist noch vergleichsweise teuer, besonders gemessen an der günstigen Windenergie (s.o.). Trotz dieses Mankos in der Ausgestaltung ist die Förderung der erneuerbaren Energien einerseits eine sinnvolle Ergänzung zum Emissionsrechtehandel – wie die Erläuterung der nachfolgenden Effekte zeigen wird – andererseits ist sie mittelfristig alternativlos. Im Folgenden werden jene Vorteile des EEG herausgestellt, die durch das Instrument des Emissionsrechtehandels nicht oder nur unzureichend erreicht werden können.

Lernkurven- und Skaleneffekte

Die Kritik am EEG geht von der Annahme vollkommener Märkte, in denen sich neue Technologien optimal zum gesamtwirtschaftlichen Vorteil durchsetzen, aus. Vollständig neue Technologien sind jedoch – abgesehen von den bei allen Innovationen anfallenden FuE-Investitionen – durch die fehlende Marktdurchdringung zu Beginn des Produktlebenszyklus benachteiligt. Sie können durch Lernkurveneffekte und den Übergang zur Massenproduktion sehr hohe Kosteneinsparungen erreichen, allerdings erst längerfristig und nach vergleichsweise hohen Anfangsinvestitionen. Inkrementelle Innovationen erfordern dagegen häufig nur geringe Änderungen und können unter Umständen sehr schnell implementiert werden, so dass damit verbundene Kostensenkungen vergleichsweise schnell realisiert werden können.

Zwar erhöht der Emissionshandel die Chance des Einsatzes von Technologien, die ohne Berücksichtigung von Umwelteffekten teurer sind als die etablierten Technologien. Da aber immer diejenige Technologie ausgewählt wird, die zum jeweiligen Zeitpunkt am günstigsten ist, werden fundamental neue Vermeidungstechnologien, die erst durch Marktdurchdringung und damit verbundene überbetrieblich verursachte Kostendegression die Konkurrenzfähigkeit mit anderen, bereits etablierten Vermeidungsalternativen erreichen können, nicht wettbewerbsfähig und damit auch nicht eingesetzt. Dies gilt selbst dann, wenn diese neuen Technologien langfristig kostengünstiger sind als andere Vermeidungsmaßnahmen. Die breite Implementierung der erneuerbaren Energien stellt einen grundlegenden Systemwechsel in der Stromerzeugung dar, der nur in der langen Frist vollzogen werden kann. Der kurzfristige Entscheidungshorizont privater Akteure führt stets zu einer Bevorzugung inkrementeller Innovationen, die kurzfristig geringere Kosten verursachen, gegenüber fundamentalen Innovationen, die sich erst langfristig als günstiger erweisen. Um Kosteneinsparungen durch Lernkurven- und Skaleneffekte zu ermöglichen, müssen Technologien aber in großem Maßstab verwendet werden (vgl. IEA 2000). Da der unvollkommene Markt dies allein nicht gewährleistet, ist eine Steuerung durch ein Förderinstrument wie das EEG erforderlich.

Eine frühzeitige Förderung erneuerbarer Energien hat außerdem den Vorteil, dass dadurch später ein starker Anstieg der Emissionspreise vermieden werden kann (vgl. dazu auch Del Rio Gonzales 2008). Sie kann verhindern, dass die gesellschaftlichen Vermeidungskosten bei steigender Vermeidungsanforderung explosiv ansteigen, wenn inkrementelle Vermeidungsmaßnahmen nicht mehr ausreichen. Dies ist besonders dann von Bedeutung, wenn der Emissionshandel – wie in der EU – so gestaltet ist, dass die Emissionsvermeidungsziele über die Zeit immer strikter festgelegt werden. Eine frühe Förderung vielversprechender Technologien kann damit die Erreichung strikter Emissionsziele mit geringerem Widerstand erlauben.

Pfadabhängigkeiten von Investitionen bei Unsicherheiten

Für eine kostenminimierende Emissionsvermeidung durch den Emissionshandel wird in der gängigen Theorie unterstellt, dass Unternehmen die ihnen zur Verfügung stehenden Vermeidungsmaßnahmen in eine Rangfolge bringen: zuerst die insgesamt kostengünstigsten Maßnahmen, mit denen ein bestimmtes Maß an Vermeidung erreicht werden kann, dann die etwas teureren, die weitere Emissionsreduktionen ermöglichen, und schließlich noch kostenaufwändigere. So werden zuerst alle kostengünstigen Möglichkeiten genutzt, bevor auf teurere zurückgegriffen wird.

Tatsächlich aber bestehen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Maßnahmen. Teurere Alternativen, bei denen es zur Nutzung vollständig anderer Technologien kommt, machen die bisher getätigten Maßnahmen teilweise obsolet.

Wenn Unternehmen immer langfristig unter vollkommener Voraussicht planen können, werden sie mit diesem Problem nicht konfrontiert. Wenn sie wissen, wie sich über zukünftige Perioden der Zertifikatspreis und die Kosten der verschiedenen Alternativen entwickeln, wählen sie die Kombination von Alternativen, bei der sie über die Gesamtlaufzeit der Investitionen die niedrigsten Kosten haben. Bildet ihre Einschätzung die Realität richtig ab, wird das Emissionsziel auf dem langfristig kostengünstigsten Weg erreicht. Ist dies jedoch nicht der Fall, und die Unternehmen haben beispielsweise die Entwicklung der Zertifikatspreise unterschätzt, entstehen im Nachhinein unnötige Kosten.

Tatsächlich ist vollkommene Voraussicht weder für den Staat noch für private Akteure gegeben, weder in der Emissionsvermeidung noch bei rein kommerziellen Investitionen, so dass diese unnötigen Kosten immer wieder auftreten. Im Fall des Übergangs zu einer weitgehend dekarbonisierten Elektrizitätsversorgung gewinnen solche Probleme an Brisanz. Dies ergibt sich aus der Faktorspezifi-

zität, das heißt dem Grad der alternativen Verwendbarkeit getätigter Investitionen (vgl. Williamson 1990, 60). Investitionen in der Energiewirtschaft sind sehr oft gekennzeichnet von einem hohen Grad an Faktorspezifität, sind also überwiegend nur für einen bestimmten Verwendungszweck vorgesehen und gelten, einmal getätigt, als irreversible Kosten (sunk costs). Auch Investitionen in Infrastrukturen sind im Strombereich mit einem hohen Maß an Voraussicht kosteneffizienter zu gestalten. Zusätzlich werden Versorgungsengpässe vermieden, wenn mit deutlichem Vorlauf vor einer Strukturveränderung des Stromangebots geplant und gebaut werden kann. Es bedarf daher einer frühzeitigen Festlegung des gewünschten Erzeugungsportfolios und seiner Standortstruktur.

Es ist davon auszugehen, dass die Preise für Emissionszertifikate bei einer schrittweisen Verschärfung des Emissionsminderungsziels steigen werden. Wenn Unternehmen sich aber hauptsächlich an den relativ niedrigen herrschenden Zertifikatkosten orientieren (oder den zukünftigen Zertifikatspreis stark unterschätzen), kommt es zu Investitionen, mit denen zwar Emissionen reduziert werden, die aber zum einen langfristig nicht ausreichend sind und zum anderen die relative Vorzüglichkeit weiterer Emissionsminderungsmaßnahmen zugunsten von Verbesserungen an den bestehenden Anlagen verändern.

Selbstverständlich verfügt auch der Staat nicht über vollständige Informationen, jedoch besteht hier ein zentraler Unterschied: Die Wirkungsweise des Emissionshandels beruht auf den staatlich gesetzten Emissionsobergrenzen. Die Unternehmen richten sich aber nicht nach dem relativ klaren langfristigen Ziel, sondern nach ihrer Einschätzung über die Preisentwicklung. Beim Emissionshandel schlägt sich Unsicherheit jedoch im Preis nieder. Damit ist die Basis von privaten Entscheidungen deutlich unsicherer und volatiler als die der staatlichen Entscheidungen, nämlich das Emissionsziel. Hinzu kommt auch eine Unsicherheit über die langfristige Glaubwürdigkeit politischer Vorgaben. Beides führt dazu, dass Aussagen über die langfristige Entwicklung des Zertifikatspreises mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Fehlerhafte und insbesondere nach unten abweichende Einschätzungen der langfristigen Entwicklung der Zertifikatspreise im Emissionshandelssystem führen schnell zu Abweichungen von langfristig kostenminimalen Lösungen.

Probleme bei der Finanzierung von Emissionsvermeidungsmaßnahmen

Im Grundmodell des Emissionshandels wird Finanzierungsproblemen keine Bedeutung beigemessen. Alle Investitionen, die eine entsprechende Kapitalrentabilität aufweisen, können theoretisch auch finanziert werden. Dies entspricht jedoch nicht der Realität. Banken können sich zwar die Über-

nahme höherer Kreditausfallrisiken durch entsprechend höhere Zinssätze vergüten lassen, sie sind aber schon aufgrund geltender Eigenkapitalvorschriften angehalten, relativ hohe Sicherheitsanforderungen an die Vergabe von Krediten zu stellen. Einer Studie des Chatham House zufolge ist es entscheidend, dass politische Maßnahmen die Faktoren adressieren, die in die Bewertung durch die Banken einfließen, wenn sie die Finanzierbarkeit von Projekten analysieren (vgl. Hamilton 2009). Dabei müssen alle bestehenden Risiken berücksichtigt werden, auch solche, die durch staatliche Regulierung und Intervention und die Grenzen der bestehenden Infrastruktur entstehen. Von zentraler Bedeutung sind eindeutige Ziele sowie die langfristige politische Stabilität und die Präzision in der Ausgestaltung der Instrumente. Dies erklärt, warum der größte positive Einfluss auf die Investitionsfreudigkeit von Kapitalgebern bisher von einer Politik zur Förderung erneuerbarer Energien ausging, die verlässliche Einnahmen wie feste Einspeisevergütungen generierte (vgl. Hamilton 2009).

Fazit

Der Klimawandel verlangt die Dekarbonisierung unserer Industriegesellschaft und eine vollständig emissionsfreie Stromversorgung. Um dieses Ziel zu erreichen, bieten sich einerseits verschiedene Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz an. Effiziente Nutzung von Energie bedeutet schließlich Energieeinsparung und trägt somit am nachhaltigsten und auch am kostengünstigsten zum Klimaschutz bei. Andererseits sind die erneuerbaren Energien die einzig nachhaltige Form der Stromerzeugung. Die zu bewerkstellende Umstellung auf 100% erneubare Energien ist jedoch von grundlegend struktureller Natur. Um diese zu gestalten, sind staatliche Eingriffe in den Energiemarkt notwendig. Dabei stellt der europaweite Emissionsrechtehandel eine wichtige erste Maßnahme zum Klimaschutz dar, allerdings ist dieses Instrument nicht geeignet, die Marktdurchdringung der erneuerbaren Energien zu fördern, und versagt als einziges Instrument aus mehreren Gründen:

- Ein Preis für Kohlenstoff verbessert auch die Wettbewerbsfähigkeit von Technologien, die aus der Perspektive mehrdimensionaler Nachhaltigkeitskriterien als nicht dauerhaft akzeptabel angesehen werden.
- Wegen Lernkosteneffekten werden bestimmte Technologien erst als Folge einer breiten Marktdurchdringung wettbewerbsfähig. Diese Marktdurchdringung unterbleibt jedoch, solange der Emissionshandelspreis niedrig ist.
- Ein entsprechend hoher Sockel kohlenstoffintensiver Stromerzeugung reduziert die Preiselastizität auf später erforderliche Mengenverknappungen und führt damit zu extremen Verteuerungen des Zertifikatspreises.

- Der frühzeitige Ausbau erneuerbarer Energien erhöht die Preiselastizität der Nachfrage nach Zertifikaten und kann damit zu dynamischer Effizienz beitragen.
- Der Emissionshandel allein wird kaum signifikante Anreize für Stromeffizienz leisten und nur einen Teil der externen Effekte des Stromverbrauchs abdecken. Erhebliche, sehr kostengünstige Potenziale der Stromeinsparung blieben daher ungenutzt.

Aus diesen Gründen sollte der Emissionshandel durch weitere Politiken flankiert werden. Voraussetzung dafür ist eine Systementscheidung für einen kohlenstofffreien Strommix. Es gibt gute Gründe, den erneuerbaren Energien dabei den Vorzug zu geben.

Literatur

- Agentur für Erneuerbare Energien (o.J.), *5* 100% = 2050*, online verfügbar unter: <http://www.unendlich-viel-energie.de/de/startseite/detailansicht/article/19/5-x-100-2050-fuenf-studien-1-ergebnis-deutschland-ist-erneuerbar.html>.
- Barker, T., A. Dagoumas und J. Rubin (2009), »The macroeconomic rebound effect and the world economy«, *Energy Efficiency* 2(4), 411–427.
- Bundesregierung (2011), »Eckpunkte Der Weg zur Energie der Zukunft – sicher, bezahlbar und umweltfreundlich«, online verfügbar unter: <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2011/06/2011-06-06-energie-wende-kabinettsbeschluss-doorpage-energiekonzept.html>.
- CDU, CSU, FDP (2009), *Wachstum, Bildung, Zusammenhalt, Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und FDP*, 17. Legislaturperiode, Berlin, online verfügbar unter: <http://www.cdu.de/doc/pdfc/091026-koalitionsvertrag-cdu-csu-fdp.pdf>.
- Donges, J.B., J. Eekhoff, L.P. Feld, W. Möschel und M.J.M. Neumann (2009), *Für einen wirksamen Klimaschutz*, Stiftung Marktwirtschaft, Schriftenreihe 49, Berlin.
- Duscha, M., D. Seebach und B. Griebmann (2006), *Politikinstrumente zur Effizienzsteigerung von Elektrogeräten und -anlagen in Privathaushalten, Büros und im Kleinverbrauch*, Umweltbundesamt, UBA-Texte 20/06, Dessau.
- ECF (European Climate Foundation), McKinsey & Company, KEMA, The Energy Futures Lab at Imperial College London, Oxford Economics (2010), *Roadmap 2050: A practical guide to a prosperous, low-carbon Europe. Vol. 1: Technical analysis*. Den Haag: ECF, online verfügbar unter: http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/Volume1_fullreport_Press-Pack.pdf.
- Europäische Kommission (2011), *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*, COM(2011) 112, Europäische Kommission, Brüssel.
- FVEE (ForschungsVerbund Erneuerbare Energien) (2010), *Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100% erneuerbaren Energien*, FVEE, Berlin.
- Fischedick, M. und S. Samadi (2010), »Die grundsätzliche wirtschaftstheoretische Kritik am Erneuerbare-Energien-Gesetz greift zu kurz«, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 60(1–2), 122–128.
- Fronzel, M. und N. Ritter (2010), »Deutschlands Art der Förderung erneuerbarer Energien: Nicht zur Nachahmung zu empfehlen«, *Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht* 33(3), 261–281.
- Gavel, E. und P. Lehmann (2011), »Macht der Emissionshandel die Förderung erneuerbarer Energien überflüssig?«, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 61(3), 24–28.
- Greenpeace (2009), *Klimaschutz: Plan B – Energiekonzept für Deutschland*, Greenpeace, Hamburg.
- Hamilton, K. (2009), »Unlocking Finance for Clean Energy: The Need for »Investment Grade« Policy», Chatham House. Energy, Environment and Development Programme Paper 04/09, London.
- Hertin, J., C. Hey und F. Ecker (2010), »The Future of the European Electricity Supply: Moving from Energy-Mix Projections to Renewables-Based Scenarios«, *Renewable Energy Law and Policy Review* 1(2), 131–139.
- Hohmeyer, O. und C. Hartmann (2010), »Knappe CO₂-Speicherstätten für Biomasse-CCS«, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 60(1–2), 144–148.
- Holm-Müller, K. und M. Weber (2010), *Plädoyer für eine instrumentelle Flankierung des Emissionshandels im Elektrizitätssektor*, online verfügbar unter: http://www.umweltrat.de/cae/servlet/contentblob/1098104/publicationFile/88541/2010_06_Emissionshandel_Strom.pdf.
- IPCC (2007), »Summary for Policymakers«, in: B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave und L.A. Meyer (Hrsg.), *Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- IEA (2000), *Experience Curves For Energy Technology Policy*, IEA, Paris.
- Irrek, W. und S. Thomas (2006), *Der EnergieSparFonds für Deutschland*, Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf.
- KfW und ZEW (2011), *CO₂-Barometer 2011 – Hoher Anpassungsbedarf im EU-Emissionshandel ab 2013 – deutliche Defizite bei der Vorbereitung in den Unternehmen*, Frankfurt am Main, online verfügbar unter: <http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/co2panel/CO2Barometer2011.pdf>.
- Leiprand, A., U. Eggenstein und M. Faulstich (2009), »Relevanz der CCS-Technologie für die Abfallverbrennung«, in: B. Bilutewski, A.I. Urban und M. Faulstich (Hrsg.), *Thermische Abfallbehandlung 2008*, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik Band 14, Universität Kassel, kassel university press GmbH, Kassel, 73–86.
- Matthes, F.C. (2010), *Der Instrumenten-Mix einer ambitionierten Klimapolitik im Spannungsfeld von Emissionshandel und anderen Instrumenten*, Bericht für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Öko-Institut, Berlin, Darmstadt, Freiburg.
- Monopolkommission (2009), *Strom und Gas 2009: Energiemärkte im Spannungsfeld von Politik und Wettbewerb*, Sondergutachten der Monopolkommission gemäß § 62 Abs. 1 EnWG, Sondergutachten der Monopolkommission 54, Nomos, Baden-Baden.
- Prognos AG, EWI (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln) (2007), *Energieszenarien für den Energiegipfel 2007 (Inklusive Anhang 2%-Variante)*, Endbericht. Prognos AG, EWI, Basel, Köln.
- Rat der Europäischen Union (2009), »Schlussfolgerungen des Vorsitzes«, Tagung des Europäischen Rates, 29./30. Oktober 2009, Rat der Europäischen Union, 15265/1/09, Brüssel.
- Rio González, P. del (2008), »Policy implications of potential conflicts between short-term and long-term efficiency in CO₂ emissions abatement«, *Ecological Economics* 65(2), 292–303.
- RWI (Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung) (2009), *Die ökonomischen Wirkungen der Förderung Erneuerbarer Energien: Erfahrungen aus Deutschland*, Endbericht. RWI, Essen.
- Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (2009), *Die Zukunft nicht aufs Spiel setzen: Jahresgutachten 2009/10*, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Sinn, H.-W. (2008), *Das Grüne Paradoxon. Plädoyer für eine illusionsfreie Klimapolitik*, Econ, Berlin.
- Sorrell, S. (2007), *The Rebound Effect: An assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency*, Energy Research Centre, London.
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2006), *SRU Die nationale Umsetzung des europäischen Emissionshandels: Marktwirtschaftlicher Klimaschutz oder Fortsetzung der energiepolitischen Subventionspolitik mit anderen Mitteln?* Stellungnahme 11. Berlin, online verfügbar unter: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2006_Stellung_Die_nationale_Umsetzung_Emissionshandel.pdf?__blob=publicationFile.
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2008), *Umweltgutachten 2008, Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels*, Erich Schmidt, Berlin, online verfügbar unter: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2008_Umweltgutachten_BTD.pdf?__blob=publicationFile.
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2009), *Abscheidung, Transport und Speicherung von Kohlendioxid: Der Gesetzentwurf der Bundesregierung im Kontext der Energiedebatte*, SRU, Stellungnahme 13, Berlin, online verfügbar unter: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2009_Stellung_Abscheidung_Transport_und_Speicherung_von_Kohlendioxid.pdf?__blob=publicationFile.
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2011), *Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung*. SRU. Sondergutachten, Berlin, online verfügbar unter: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2011_07_SG_Wege_zur_100_Prozent_erneuerbaren_Stromversorgung.pdf?__blob=publicationFile.
- Schächtele, K. und H. Hertle (2007), *Die CO₂-Bilanz des Bürgers Recherche für ein internetbasiertes Tool zur Erstellung persönlicher CO₂-Bilanzen*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UBA (Umweltbundesamt) (2010), *Energieziel 2050: 100% Strom aus Erneuerbaren Quellen*, Umweltbundesamt, Dessau:

Williamson, O.E. (1990), *Die ökonomischen Institutionen des Kapitalismus: Unternehmen, Märkte, Kooperation*, Die Einheit der Gesellschaftswissenschaften 64, Mohr, Tübingen.

Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (2004), *Zur Förderung erneuerbarer Energien*, Berlin, online verfügbar unter: http://www.vku.de/de/Energiewirtschaft/Handel_Vetr._Erzeugung/Erneuerbare_Energien/EE_-_Hintergrundinfos/16.01.04_Gutachten_wissenschaftschaeg_17.pdf.

WWF (World Wild Fund For Nature) (2009), *Modell Deutschland: Klimaschutz bis 2050*, Prognos und Ökoinstitut, Basel, Berlin.